

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА РЕГИСТРАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВЧ ДИАПАЗОНА, ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕРМИНАЛОВ ДОСМОТРА ПАССАЖИРОВ

Журавлев¹ А.В., Ивашов¹ С.И., Бугаев² А.С., Разевиг¹ В.В., Васильев¹ И.А.

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

azhuravlev@rslab.ru, sivashov@rslab.ru

В докладе рассматривается возможность построения высокоскоростного терминала досмотра пассажиров, обладающего высокой проникающей способностью и высоким пространственным разрешением. Для этого рассмотрена задача о необходимой плотности и распределении выборок сигнала для двух типичных геометрий зондирования: плоской и цилиндрической. Определена наиболее существенная область голограммы для восстановления, зависящая от используемой геометрии и длины волны излучения. Для плоской апертуры зондирования предложен метод восстановления на основе быстрого преобразования Фурье, позволяющий восстанавливать голограммы в реальном времени. Для восстановления голограмм, зарегистрированных на произвольной поверхности в узлах произвольной сетки, был рассмотрен корреляционный метод, используемый в системах ММО. В алгоритмах восстановления рассмотрены узкополосные и широкополосные сигналы. Для голограмм, зарегистрированных на небольшом расстоянии, рассмотрен алгоритм восстановления с использованием двух близкорасположенных частот в качестве альтернативы использованию широкой полосы. Проведено численное моделирование голограмм для трехмерных геометрических моделей человека и посторонних объектов, в котором была использована однократная модель рассеяния. Было показано, что для достижения приемлемого контраста посторонних объектов требуется полоса сигнала не менее 5 ГГц. С использованием изготовленного радиоголографического сканера были получены экспериментальные голограммы манекена, под одеждой которого располагались различные предметы: куски мыла, имитирующие взрывчатку, пистолет и другие металлические предметы. Зондирование осуществлялось с различных расстояний от непосредственной близости до расстояния одного метра. Приведены полученные радиоизображения вместе с фотографиями объектов. На полученных изображениях поверхность тела человека и посторонние предметы имеют соизмеримый видимый контраст, который может быть повышен за счет расширения полосы сигнала. В заключительной части предложен новый способ инверсного синтезирования голограмм, использующий синхронную фиксацию позы свободно перемещающегося человека. При этом вертикальное разрешение может осуществляться за счет использования вертикально расположенной линейки приемопередатчиков, а горизонтальное разрешение – за счет естественного перемещения человека. Еще одним вариантом реализации полученных результатов может стать создание ручного радиолокатора для обследования подозрительных пассажиров. Способ оперирования таким радиолокатором может быть аналогичен использованию ручного металлодетектора, но в отличие от него, радиолокатор позволит получить изображения скрытых под одеждой металлических и диэлектрических предметов с разрешением не хуже 1 см.

Ключевые слова: радиоголография, восстановление голограмм, апертурный синтез, радиолокатор, безопасность на транспорте, досмотр пассажиров.

Введение

Используемые в настоящее время радиоволновые системы досмотра пассажиров используют излучение миллиметрового диапазона, которое обладает значительным затуханием под

плотной или влажной одеждой человека, что затрудняет и ограничивает использование таких систем. Испытуемому приходится раздеваться и принимать статическую позу на время сканирования, из-за чего увеличивается время осмотра и, следовательно, снижается пропускная способность таких систем. Использование длины волны 3 мм, как, например, в системах Rapiscan Systems и Smiths Detection, позволяет достичь высокого разрешения, достаточного для обнаружения мелких предметов размером несколько сантиметров, но при этом появляются многочисленные артефакты в местах складок одежды, подмышечных впадинах и других местах. Элементарная база миллиметрового диапазона является сравнительно дорогой, что приводит к значительной стоимости систем досмотра, ограничивая широту их применения. Для использования систем досмотра пассажиров на железнодорожных терминалах необходима система, которая была бы лишена перечисленных недостатков. Она должна иметь достаточное разрешение, обладать хорошей проникающей способностью для плотной и влажной одежды, допускать досмотр пассажиров, не затрудняя и не ограничивая их естественное перемещение. В данной работе рассмотрены возможности использования волн сантиметрового диапазона для получения изображений скрытых под одеждой человека предметов. Волны данного диапазона, по сравнению с миллиметровыми волнами, имеют значительно более низкий коэффициент затухания в средах с высокой влажностью. Увеличенная длина волны при этом должна привести к ухудшению пространственного разрешения, но это не должно оказать существенного влияния на обнаружение крупных предметов размером несколько сантиметров. Кроме того, количество отражений от мелких неоднородностей, зашумляющих конечное восстановленное изображение, должно уменьшиться. Низкая стоимость элементарной базы сантиметрового диапазона должна привести к более низкой стоимости радиолокационной системы. Для повышения скорости сканирования рассмотрена возможность использования обработки сигнала, применяемой в ММО системах. В целях оценки максимально достижимой разрешающей способности в таких системах, плотность пространственной выборки не ограничивалась, а выбиралась в соответствии с теоремой о выборках, сформулированной для выборки пространственно распределенных интерференционных картин.

В докладе рассмотрены методы восстановления радиоголограмм. Проведена оценка необходимого шага дискретизации для плоской и цилиндрической апертур зондирования, зависящая от относительного расположения антенн радиолокатора и зондируемого объекта. Рассмотренный метод восстановления допускает удобную численную реализацию с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье, что позволяет восстанавливать изображения в реальном времени. Для получения радиоизображения с использованием пространственно распределенных приемо-передатчиков (ММО) рассмотрен метод восстановления с использованием свертки. Далее рассмотрен метод восстановления в системах с узкой полосой зондирования, который, при указанных ограничениях, позволяет вычислять дальность до зондируемого объекта и использовать эту информацию для дополнительной постобработки восстановленных с использованием одной частоты изображений.

На предварительном этапе проведено моделирование голограмм. Описана модель тела человека с расположенным вблизи ее поверхности пистолетом, которая использовалась в численных экспериментах. Приведены результаты восстановления изображения с использованием одночастотного метода, а также широкополосного зондирующего сигнала.

Описан аппаратно-программный комплекс, изготовленный для регистрации радиоголограмм. Приведен внешний вид системы с механическим сканером для перемещения микроволнового датчика в двух направлениях, а также составляющие последнего: передатчик, приемник, антенны круглого и прямоугольного сечения, микроконтроллерный блок управления. Разработанное программное обеспечение радиолокатора состоит из двух модулей: модуля Multiscan, для регистрации и отображения исходных голограмм, и модуля на языке Matlab, позволяющего восстанавливать зарегистрированные голограммы. Описаны функциональность модуля обработки данных на языке Matlab.

Описаны эксперименты с манекеном и посторонними объектами под его одеждой, такие как пистолет, простые куски мыла и те же куски, покрытые мелкими металлическими предме-

тами. Приводятся полученные радиоизображения, на которых различимы скрытые предметы с достаточно высоким пространственным разрешением.

В заключении перечислены достигнутые результаты, а также сформулированы направления следующих исследований.

1. Методы восстановления радиоголограмм

1.1 Выбор шага дискретизации и наиболее существенной области голограммы

При выборе какой-либо геометрии зондирования для регистрации голограмм возникают задачи выбора шага дискретизации и определения наиболее существенной области голограммы для ее восстановления. Критерий, которому должна удовлетворять плотность отсчетов выборки, может быть сформулирован следующим образом: при перемещении по поверхности сканирования в пределах ширины интерференционной полосы должны укладываться как минимум три отсчета. Выполнение этого условия позволяет зафиксировать наличие интерференционной полосы при регистрации радиоголограммы. Частота возникновения интерференционных полос зависит не только от геометрии зондирования, но и от длины волны излучения. Для расчета необходимой плотности выборки были рассмотрены две используемые для досмотра пассажиров плоские геометрии зондирования: цилиндрическая и плоская, изображенные на рис. 1 и 2 соответственно.

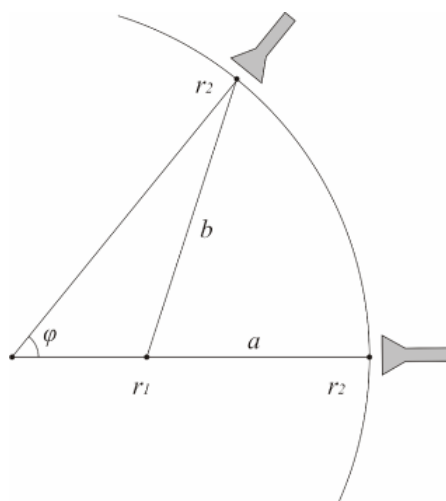


Рис. 1. Геометрия зондирования по цилиндрической поверхности

На рис. 1 точечный рассеиватель расположен в точке r_1 , а приемопередатчик перемещается из положения $\varphi = 0$ в сторону увеличения угла по окружности радиусом r_2 . Из условия наблюдения интерференционного максимума в положении, задаваемом углом φ , может быть получено следующее выражение, определяющее координаты расположения интерференционных максимумов:

$$(1) \quad \cos(\varphi_m) = 1 - \lambda \frac{r_2 - r_1}{2r_1 r_2} m - \lambda^2 \frac{1}{8r_1 r_2} m^2,$$

где целое число m задает порядок интерференционного максимума, а λ - длина волны излучения.

Аналогичное выражение может быть получено для плоской геометрии зондирования, изображенной на рис. 2:

$$(2) \quad y_m = \sqrt{\lambda x m + \frac{\lambda^2}{4} m^2}.$$

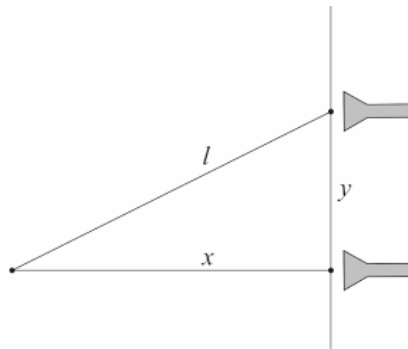


Рис. 2. Плоская геометрия зондирования

Использование цилиндрической апертуры имеет следующие преимущества по сравнению с плоской. При цилиндрическом сканировании, антенна остается не только всегда ближе к зондируемому объекту, но и направленной к нему. Это обстоятельство увеличивает потенциал системы и размер эффективной апертуры, что позволит достичь лучшего разрешения при восстановлении.

Полученные соотношения (1) и (2) были использованы не только для выбора шага дискретизации отсчетов сигнала в описываемых далее численных и натуральных экспериментах, но и для выбора существенной для восстановления голограммы области. Как известно, основной вклад в значение дифракционных интегралов от осциллирующих функций являются области около точек стационарной фазы. При этом интегралы быстро сходятся в пределах нескольких осцилляций подынтегральной функции [1, 2]. Поэтому, при восстановлении голограмм рассмотренными здесь методом свертки в качестве размера ядра выбирался размер области в пределах нескольких интерференционных экстремумов. При восстановлении методом обратного распространения будет использоваться вся область, в которой получена голограмма, поскольку в этом методе используется алгоритм быстрого преобразования Фурье и размер области не оказывает значительного влияния на скорость вычислений.

1.2 Восстановление методом обратного распространения

Метод обратного распространения заключается в регистрации комплексной амплитуды отраженного объектом излучения на некоторой поверхности и последующего решения комплексно сопряженного волнового уравнения с использованием зарегистрированной комплексной амплитуды в качестве граничного условия. При регистрации комплексной амплитуды поля на плоскости, метод обратного распространения может быть реализован с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Описанный подход может быть выражен формулой [3]:

$$(3) \quad r(x, y) = \Phi_{2D}^{-1} \left\{ \Phi_{2D} \{ E(x, y) \} e^{i\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \right\},$$

где $r(x, y)$ - функция, описывающее распределение источников в произвольной плоскости, параллельной плоскости регистрации, и удаленной от нее на расстояние z_0 , $E(x, y)$ - комплексная амплитуда зарегистрированного радиолокатором сигнала, k - волновое число в среде, k_x и k_y - проекции волнового числа на координатный оси, Φ_{2D} и Φ_{2D}^{-1} обозначают прямое и обратное двумерные преобразования Фурье соответственно.

Отображение абсолютной величины найденного распределения комплексной амплитуды при фиксированном z_0 в виде изображения дает представление о распределении источников, расположенных на расстоянии z_0 от плоскости регистрации. При восстановлении голограмм с использованием соотношения (3) имеет смысл обнулять коэффициент разложения, соответствующий интенсивной плоской волне, распространяющейся вдоль оси Z . Данная плоская волна представляет равномерную засветку всей области восстановления изображения и не несет информации об объекте.

1.3 Восстановление методом свертки в системах ММО

Метод восстановления с использованием разложения на плоские волны удобно использовать, когда регистрация голограммы осуществляется на плоскости. При регистрации интерференционной картины на других поверхностях, особенно в узлах разреженной сетки в системах типа ММО, использование разложения на плоские волны также возможно, но требует введения дополнительного этапа пересчета зарегистрированных данных на плоскую апертуру и интерполяции на равномерную сетку в декартовой системе координат [3, 4]. В случае использования цилиндрической или сферической апертуры при регистрации голограмм удобно воспользоваться свойством симметрии и воспользоваться методом восстановления на основе свертки. Для эффективного вычисления свертки для цилиндрической или сферической апертур можно снова прибегнуть к быстрому преобразованию Фурье. В этом случае распределение источников будет получено на равномерной сетке в цилиндрической или сферической системах координат. Последующая обработка может потребовать пересчета полученного распределения на равномерную сетку в декартовой системе координат или расчета проекции на некоторую плоскость, являющуюся сечением рассчитанного объема данных.

В методе восстановления с использованием свертки, мерой интенсивности сигнала, приходящего из точки фокусировки, задаваемой вектором \mathbf{r}_f , является результат свертки регистрируемого сигнала $E(i, j)$ с комплексно сопряженным сигналом (ядро свертки) $E^*(i, j; \mathbf{r}_f)$, ожидаемым из этой точки [5]:

$$(4) \quad I(\mathbf{r}_f) = \left| \sum_{i,j} E(i, j) E^*(i, j; \mathbf{r}_f) \right|, \text{ где}$$

$$(5) \quad E(i, j; \mathbf{r}_f) \equiv E(\mathbf{r}_{i,j}; \mathbf{r}_f) = \frac{\exp(i2k|\mathbf{r}_{i,j} - \mathbf{r}_f|)}{|\mathbf{r}_{i,j} - \mathbf{r}_f|^2}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

В выражении (5) $\mathbf{r}_{i,j}$ – вектор, указывающий в узел (i, j) регулярной сетки, где осуществляется выборка сигнала.

В приведенном выражении ядро свертки может учитывать аппаратную функцию прибора, используемого для регистрации голограмм. Кроме этого, размер ядра свертки будет зависеть от расстояния, на котором расположен объект от поверхности зондирования. Для выбора этой области был использован критерий, используемый для оценки наиболее существенной области для отражения [2], о котором говорилось ранее.

1.4 Использование полосы частот

Использование полосы частот позволяет производить дополнительную фокусировку по дальности, что позволит разрешать объекты, расположенные друг относительно друга на меньшем расстоянии, чем в случае использования одночастотного сигнала, когда разрешение по глубине достигается только за счет апертурного синтеза.

Конечное выражение, используемое в дальнейшем для фокусировки многочастотных голограмм, может быть записано в виде [3]:

$$(6) \quad r(x, y, z) = \Phi_{3D}^{-1} \left\{ \Phi_{2D} [u(x, y, \omega)] \cdot e^{-i\sqrt{4(\omega/c)^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \right\} = \Phi_{3D}^{-1} \{S\},$$

где обозначения аналогичны выражению (3), а Φ_{3D}^{-1} является обратным трехмерным преобразованием Фурье.

Использование выражения (6) для восстановления радиоголограмм предполагает применение быстрых преобразований Фурье. Обычно голограмма регистрируется на дискретной равномерной координатной сетке (x, y, ω) , поэтому для получения ее спектра может быть использовано двумерное БПФ. Из выражения (6) следует, что отсчеты k_z распределены нерав-

номерно при изменении k_x и k_y , а лежат на концентрических сферах радиуса $2k$. Поэтому использовать БПФ непосредственно для вычисления $\Phi_{3D}^{-1}\{S\}$ нельзя.

Для решения этой проблемы существует два подхода. Во-первых, можно пересчитать S на равномерную сетку по всем координатам. Но так как S быстро меняется в зависимости от k_z , допустимо использовать только линейную интерполяцию, а в результате такой процедуры происходит частичная потеря данных, которая ведет к ухудшению разрешения по дальности (координата z).

Второй подход заключается в применении специальных алгоритмов для быстрого преобразования Фурье на неравномерной сетке [6]. Результаты проведенного в рамках настоящего исследования компьютерного моделирования показали, что второй метод показывает заметно лучшие результаты восстановления радиоголограмм. Поэтому, несмотря на сложность реализации, целесообразно использовать именно его.

1.5 Двухчастотный метод восстановления голограмм

При зондировании с небольшого расстояния, когда эффекты дифракции радиоволн невелики, можно воспользоваться двухчастотным методом для получения оценки дальности до зондируемого объекта.

Если z – расстояние от приемопередатчика до отражающей поверхности, тогда изменение фазы отраженного сигнала, который проходит путь туда и обратно, можно записать следующим образом [7]:

$$(7) \quad \varphi(z, f) = \varphi_0 + 2k(f)z,$$

где φ_0 – некоторое постоянное слагаемое, учитывающее характеристики прибора, а так же фазу при отражении от поверхности объекта, $k(f)$ – волновое число, зависящее от частоты.

При распространении волны в свободном пространстве волновое число $k(f) = 2\pi f / c$, где c – скорость света в вакууме. Взятие частной производной по частоте позволяет найти расстояние до объекта

$$(8) \quad z_0 = \frac{c}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial f}.$$

Имея полученное значение z_0 , можно построить функцию

$$(9) \quad A(z) = \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{\sigma^2}\right),$$

которая принимает максимальное значение при $z = z_0$ и быстро спадает на расстоянии порядка σ . Значение этого параметра должно выбираться в зависимости от длины волны излучения. Функция $A(z)$ может быть использована теперь с восстановленной голограммой (распределение источников) на какой-либо одной из двух используемых частот. А именно, она является множителем, который оставляет только ту часть распределения источников, которая попадает в небольшую область около z_0 . Голограмма при этом может быть восстановлена методом корреляции [5] или обратного распространения [3, 7].

2 Моделирование голограмм и их восстановление

Для оценки зависимости качества восстановленного изображения от выбора диапазона частот были проведены соответствующие расчеты. В этих расчетах в качестве объекта зондирования были использованы трехмерные модели поверхности человеческого тела и пистолета. Визуализированная с использованием программы 3D моделирования поверхность человеческого тела с пистолетом изображена на рис. 3. На том же рисунке прямоугольником обозначена область, в которой вычислялось распределение отраженного поля. Отсчет комплексной амплитуды поля представлял собой вектор комплексных величин с размерностью равной количеству частот. Шаг дискретизации выбирался в соответствии с полученным соотношением (2). При

расчетах отраженного поля использовалась модель однократного рассеяния, которая не учитывает переотражения и взаимное влияние отражающих элементов поверхности. Кроме того, коэффициенты отражения для поверхности модели тела человека и пистолета принимались одинаковыми.

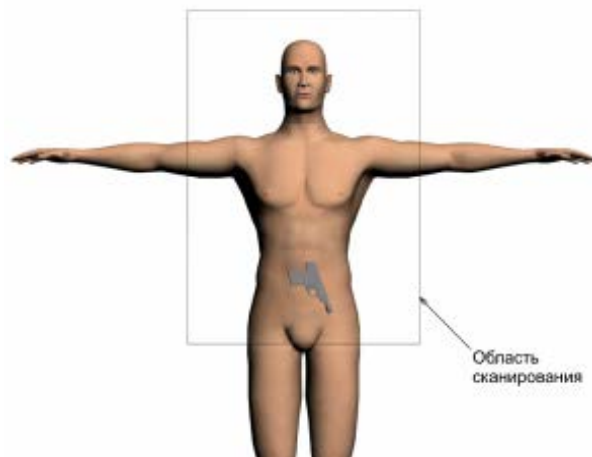


Рис. 3. Модели человека и постороннего объекта на его теле, использованные в численных экспериментах

На рис. 4а изображено рассчитанное распределение синфазной компоненты отраженного поля для частоты зондирования 14.7 ГГц. Результат восстановления голограммы для глубины 70 см, полученный методом обратного распространения, показан на рис. 4б. Изображение, полученное с использованием полосы частот от 10 до 20 ГГц, показано на рис. 4в. На рис. 4в видно, что использование полосы частот, позволяет значительно повысить контраст пистолета на фоне отражений от поверхности тела.

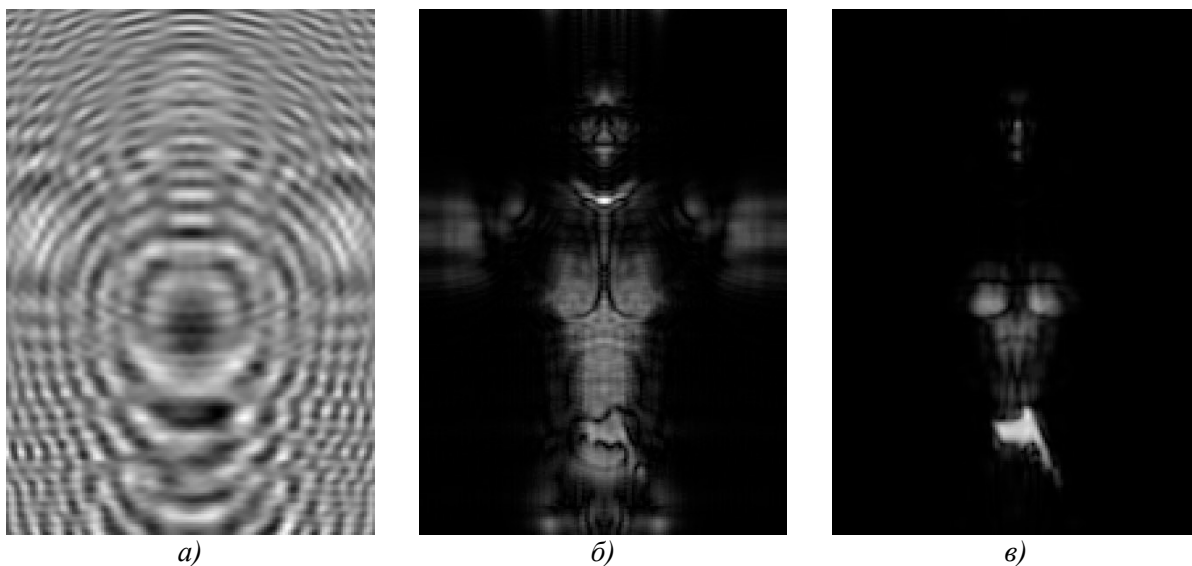
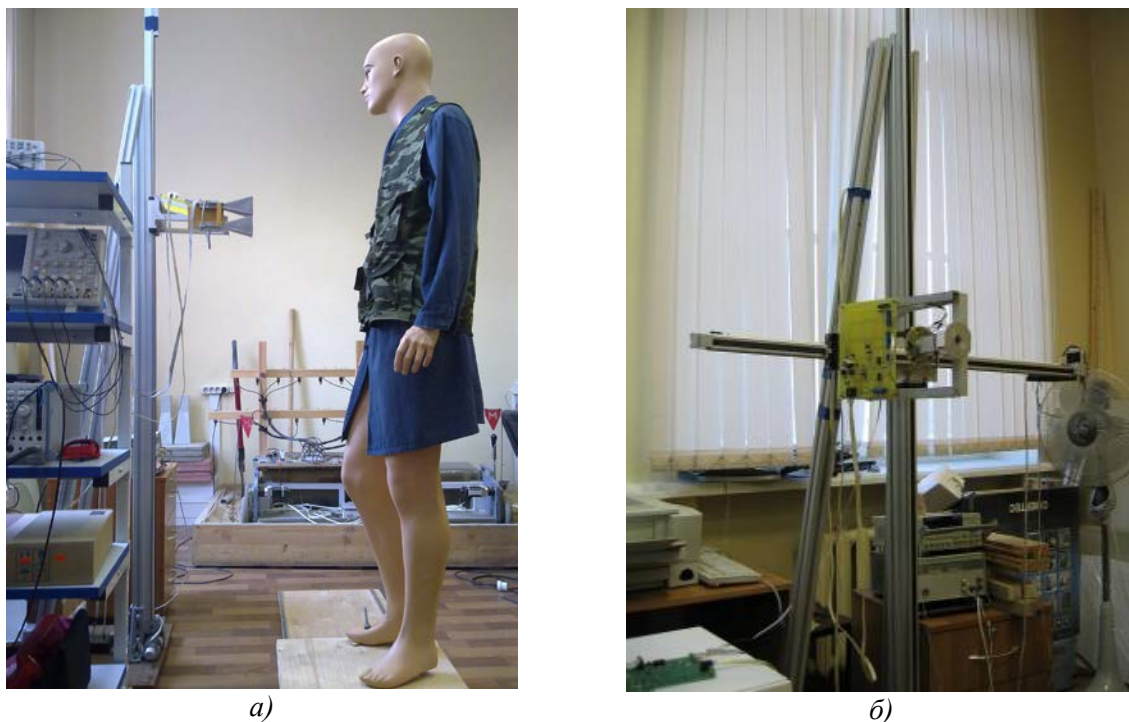


Рис. 4. Одночастотная голограмма на частоте 14,7 ГГц (а), результат восстановления одночастотной голограммы (б), результат восстановления голограммы в полосе от 10 до 20 ГГц

Численные эксперименты, проведенные с различной частотной полосой зондирования, показали, что удовлетворительные результаты могут быть получены при полосе не менее 5 ГГц.

3 Экспериментальный макет голографического радиолокатора

Для получения экспериментальных голограмм в предварительных экспериментах был использован специально изготовленный для этих целей радиолокатор, перемещаемый при помощи сканера, изображенного на рис. 5а и б. Горизонтальное перемещение манекена осуществлялось с помощью подвижной платформы (рис. 5а), либо был задействован дополнительный сканер горизонтального перемещения (рис. 5б). Используемый в предварительных экспериментах датчик со сканером может быть впоследствии заменен линейкой датчиков с электронным переключением для увеличения скорости сканирования.



*Рис. 5. Макет микроволнового сканера:
а) с подвижной платформой для горизонтального перемещения манекена,
б) с дополнительно установленной системой горизонтального перемещения датчика*

Разработанная радиоэлектронная система регистрации и восстановления радиоголограмм с высоким пространственным разрешением состоит из линейного сканера, передатчика, приемника, блока управления и антенны, программного обеспечения микроконтроллера и программного обеспечения на стороне управляющего персонального компьютера.

3.1 Передатчик

Частота передатчика от 14 до 15 ГГц была выбрана из соображений малости затухания в плотной и влажной одежде, доступности элементарной базы и достижимой разрешающей способности. Передатчик построен на основе интегрального управляемого напряжением генератора с максимальной генерируемой мощностью 7 дБм. Высокая частотная стабильность генерируемого сигнала достигается за счет использования системы фазовой автоподстройки частоты. Управление генератором осуществляется микроконтроллером по шине SPI. Передатчик может быть использован с рупорной антенной, либо с антенной в виде открытого конца волновода.

3.2 Приемник

В приемнике осуществляется режим прямого преобразования на нулевую частоту. Режим прямого преобразования является предельным случаем преобразования частоты в смесителе гетеродинного приемника, при котором частота гетеродина равна частоте принимаемого сигнала. В такой схеме первая разностная частота равна нулю и фильтр промежуточной частоты

может быть заменен фильтром низкой частоты с большой постоянной времени. Такое построение приемника имеет ряд преимуществ по сравнению с супергетеродинным приемником. Однако в связанных приемниках такая схема приема требует применения сложных систем синхронизации частоты гетеродина и принимаемого сигнала. В локационных приемниках такая схема может быть реализована относительно просто, так как в качестве гетеродина используется генератор передатчика, и вопрос синхронизации не возникает. Для устранения зависимости величины принимаемого сигнала от разности фаз гетеродина и принимаемого сигнала преобразование частоты осуществляется в двух смесителях. На их сигнальные входы подается принимаемый сигнал от синфазного делителя мощности, а на входы опорного сигнала подается сигнал через направленный ответвитель с равными амплитудами и сдвигом сигнала по фазе на девяносто градусов. При этом на выходе приемника возникают квадратурные сигналы, пропорциональные синусу и косинусу разности фаз между опорным и принимаемым сигналами.

3.3 Антенна

Передатчик и приемник радиолокатора могут быть использованы с различными типами антенн. Были проведены эксперименты с рупорными антеннами прямоугольного сечения и антенной в виде открытого конца волновода круглого сечения. В ходе экспериментов было подтверждено преимущество использования ненаправленной антенны круглого сечения, которая позволяла получать голограмму большей площади и, следовательно, большую синтетическую апертуру.

3.4 Блок управления

Для управления передатчиком в масштабе реального времени был изготовлен микроконтроллерный блок управления, который управляет передатчиком, аналого-цифровым преобразователем, и контроллером передачи данных по шине USB. Блок управления подключается к персональному компьютеру по шине USB, для адресации периферийных устройств и передачи им управляющих команд используется шина SPI. Микроконтроллер осуществляет также буферизацию передаваемых данных, которые представляют собой значения отсчетов АЦП и значения внутренних регистров интегрального синтезатора частоты, который входит в состав передатчика.

3.5 Программное обеспечение ПК

Программное обеспечение, выполняемое на стороне ПК, состоит из двух модулей: модуля Multiscan и модуля на языке Matlab, реализующего алгоритм фокусировки. Модуль Multiscan предназначен для получения, отображения и сохранения радиоголограмм в виде файла. Среди прочих параметров, которые могут быть установлены пользователем, имеются интервалы выборок и их полное количество вдоль координатных осей. С помощью данного модуля возможно также отображение в реальном времени поступающих с датчика данных в режиме бегущего графика. Данный режим используется при настройке прибора для компенсации постоянной составляющей на одной и нескольких частотах, а также для оценки амплитуды сигнала. После получения голограммы, обе ее квадратуры могут быть сохранены в виде бинарного файла для последующего использования с модулем восстановления голограмм, реализованном на Matlab. В бинарном файле также запоминаются данные об интервалах выборок вдоль координатных осей, сетке частот и др.

Полученные данные, сохраненные в файл, могут быть использованы в программе восстановления голограмм, написанной на языке Matlab. Эта среда была выбрана для написания модуля обработки сигнала, поскольку содержит требуемый набор библиотечных функций, а также функции для графического представления данных. Данная программа оформлена в виде класса Matlab, методы которого позволяют оперировать исходными данными и данными обработки. Класс содержит методы, позволяющие выполнять следующие действия: читать заголовки файла данных с параметрами системы, геометрии зондирования и выборками сигнала; отображать исходные данные (синфазная и квадратурные компоненты), данные обработки и исходную амплитудную голограмму с вычтенным фоном; интерактивно выбирать участок фона на исходной голограмме, находить среднее его значение и вычитать его из исходных

данных; интерактивно выбирать точку на голограмме, которая рассекает объем восстановленных данных на два перпендикулярных друг другу сечения, отображаемые в виде изображений; интерактивно фокусировать голограмму на произвольную глубину.

Доступ к функциям указанного класса и его интерактивным элементам осуществляется с помощью командной строки Matlab.

4 Эксперименты по регистрации и восстановлению голограмм

Радиолокационный комплекс, при создании которого был использован опыт разработки голографических радиолокаторов серии РАСКАН [8], был применен в серии экспериментов по обнаружению посторонних предметов под одеждой манекена. В качестве посторонних предметов были использованы макет пистолета и куски мыла, имитирующие взрывчатку, как с металлическими предметами, так и без них. На рис. 6а показана исходная одночастотная голограмма манекена с пистолетом у пояса, полученная с расстояния около 10 см, а на рис. 6б показан результат ее фокусировки. Частота зондирующего сигнала в этом эксперименте составляла 14,4 ГГц.

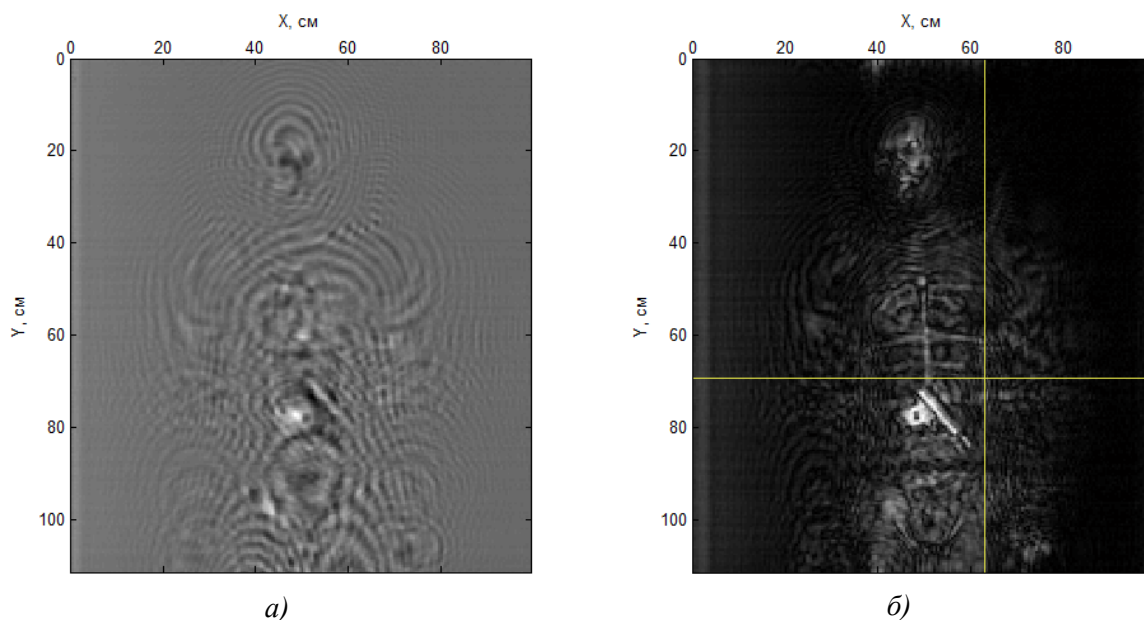
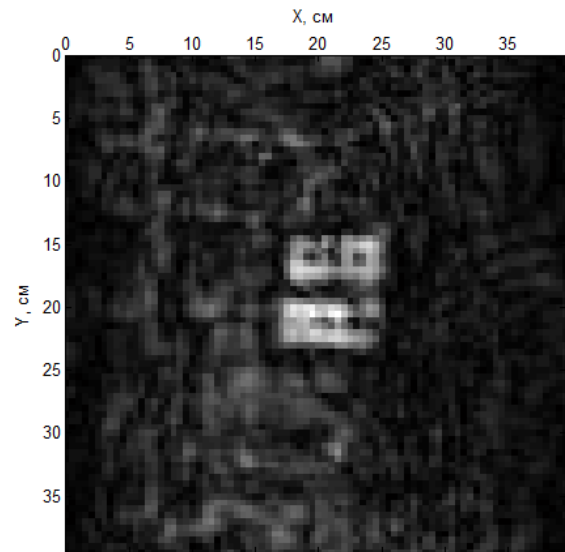


Рис. 6. Голограмма манекена с пистолетом у пояса (а) и результат ее восстановления (б)

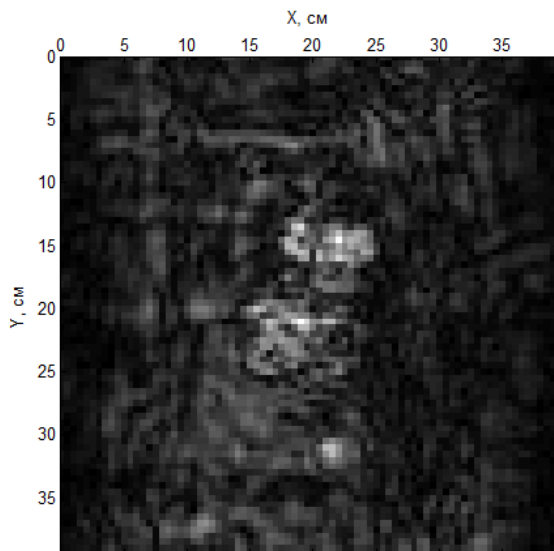
Для диэлектрических объектов – кусков мыла – были получены изображения с более низким контрастом по сравнению с изображениями, на которых был виден металлический пистолет. Пример радиолокационного изображения, на котором приведены куски мыла под одеждой человека приводится на рис. 7а-г.



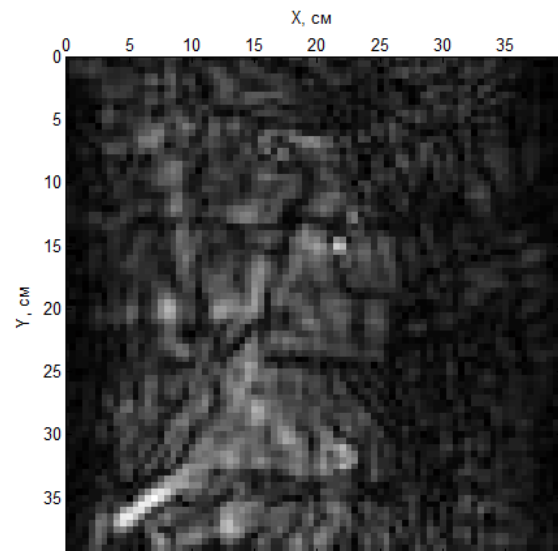
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Радиоизображения кусков мыла под одеждой манекена: а) оптическое изображение, б) мыло с шайбами, в) мыло с винтами, г) мыло без предметов

Различимые на представленных изображениях предметы имеют низкий контраст по отношению к фону, что обусловлено отсутствием полосы частот, которая позволила бы улучшить разрешение по дальности. Обзор с различных ракурсов, ограниченный диаграммой направленности антенны, с использованием только одной частоты позволяет получить удовлетворительные результаты только для простых по форме объектов в простой фоновой обстановке. Для объектов, расположенных над поверхностью со сложным рельефом, необходимо использовать полосу не менее 5 ГГц в диапазоне частот от 10 до 20 ГГц, что было показано с помощью численного моделирования. Использование двухчастотного метода восстановления голограмм с экспериментальными данными не позволило получить удовлетворительные результаты,

поскольку присущий экспериментальным данным шум приводит к дополнительным скачкам фазы, для эффективной фильтрации которых необходим более сложный алгоритм обработки.

Заключение

В ходе выполнения первого этапа проекта были рассмотрены методы восстановления одночастотных и многочастотных радиоголограмм с использованием метода обратного распространения волнового фронта и метода свертки с реализацией соответствующих алгоритмов.

Для оценки качества восстанавливаемых голограмм разными способами была рассмотрена трехмерная модель поверхности человеческого тела с посторонним объектом. Были смоделированы и восстановлены радиоголограммы для одной частоты и спектра частот. Было показано, что удовлетворительные результаты могут быть получены при использовании полосы частот не менее 5 ГГц.

Для экспериментальной регистрации голограмм был изготовлен радиолокатор на основе интегрального синтезатора частоты с квадратурным приемником прямого преобразования. Для получения, отображения, сохранения и восстановления голограмм, а также управления радиолокатором было написано соответствующее программное обеспечение, как для персонального компьютера, так и микроконтроллерного блока управления.

На изготовленном лабораторном стенде, состоящем из линейного сканера, перемещающего радиолокатор вертикально и платформы для перемещения объекта в горизонтальном направлении, были проведены эксперименты с простыми тестовыми объектами и манекеном человека с посторонними предметами. В экспериментах было достигнуто разрешение не хуже 1 см. Было показано, что выбор антенны и геометрия зондирования могут значительно влиять на качество получаемых результатов. Для расширения допустимых условий наблюдения, в которых может быть получен удовлетворительный результат, требуется более широкая полоса зондирующего сигнала. Выполнить эксперименты с радиолокационным сигналом в широкой полосе частот и различных условиях наблюдения планируется на следующем этапе выполнения проекта.

Опираясь на полученные в ходе выполнения первого этапа проекта, можно указать на возможности построения двух перспективных радиолокационных систем, которые могут быть использованы для ускоренного досмотра пассажиров. В текущих реализациях микроволновых сканеров требуется фиксация позы испытуемого на время сканирования линейкой приемопередатчиков, что значительно уменьшает скорость досмотра пассажиров. Синтетическая апертура в такой системе в одном направлении получается за счет использования линейки приемопередатчиков, а в другом направлении – за счет перемещения этой линейки. Можно предложить несколько другую конфигурацию сканера, в которой бы отсутствовало механическое перемещение. В данной конфигурации для получения синтетической апертуры в одном направлении будет использоваться две или более стационарно расположенных линеек, а в другом направлении апертура будет получаться за счет перемещения человека. Применение такого типа радиолокационных систем известно, например, для слежения за воздушными целями, а системы такого типа называются радиолокационными системами с инверсным синтезированием апертуры. Отличие радиолокационной системы для наблюдения за пассажирами заключается в том, что у перемещающегося мимо датчиков человека постоянно изменяется поза и для восстановления радиоизображений скрытых предметов потребуется синхронная регистрация данных радиолокационного сигнала и данных о мгновенной позе человека во время ходьбы. Образцом устройства, способного выполнять задачу слежения и регистрации позы человека при движении, является устройство под названием Kinect, производимое массово компанией Microsoft. Рыночная стоимость данного устройства составляет около 6 тысяч рублей. Выходными данными этого устройства являются видеоизображение разрешением 640x480 с частотой 30 кадров в секунду и карта глубины с таким же разрешением, частотой кадров и 2048 уровнями чувствительности [9]. Практическая дальность, на которой может быть использовано устройство, составляет от 0,7 до 6 метров. В линейках радиолокационных датчиков, может быть использована как голографическая обработка сигнала, так и обработка, используемая в системах ММО.

В качестве исследовательской задачи, которая может быть поставлена на следующий этап выполнения проекта, может быть задача оценки качества получаемых в такой системе радиоизображений.

Другим перспективным устройством, создание которого может быть обосновано в ходе выполнения второго этапа выполнения проекта, является ручной радиолокатор, способный получать радиоизображения скрытых предметов, расположенных под одеждой человека. Для слежения за относительным перемещением вдоль поверхности одетого испытуемого может быть также использован оптический датчик, подобный тем, что используются в оптических манипуляторах типа «мышь» с персональными компьютерами. Совместная обработка данных оптического и радиолокационного датчиков позволит получить радиоизображения не хуже приводимых в данном отчете, а использование широкой полосы частот должно значительно улучшить качество регистрируемых изображений. Оперировать таким прибором будет не сложнее, чем металлодетектором, а преимущество использования радиолокатора будет заключаться в способности получать изображение как металлических, так и диэлектрических предметов под одеждой человека.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и ОАО «РЖД» (грант № 11-07-13117-офи-м-2011-РЖД).

Литература

1. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. «Наука», 1970.
2. *Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999.
3. *Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E.* Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – V. 49, N. 9. – P. 1581-1592.
4. *Detlefsen J., Dallingier A., Huber S., Schelkshom S.* Effective Reconstruction Approaches of Millimeter-Wave Imaging of Humans Proc. XXXIIth General Assembly of International Union Radio Science (URSI), October 23-29, 2005, New Delhi, India.
5. *Kim Y.J., Jofre L., Flaviis F., Feng M.Q.* 3D Microwave Imaging Technology for Damage Detection of Concrete Structures // J. Engrg. Mech. – 2004. – V. 130, N. 7. – P. 858-866.
6. *Liu, Q. H. and N. Nguyen,* “An accurate algorithm for nonuniform fast fourier transforms (NUFFT's)”, IEEE Microwave and Gueded Wave Lett., Vol. 8, No. 1, 18–20, 1998.
7. *Popov A.V., Vinogradov V.A.* Focused Gaussian Beams in the Problem of Holographic Imaging // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2002. – V. 50, N. 9.
8. *Ivashov S., Razevig V., Vasilyev I., Zhuravlev A., Bechtel T., Capineri L.* The Holographic Principle in Subsurface Radar Technology // International Symposium to Commemorate the 60th Anniversary of the Invention of Holography. Springfield, Massachusetts USA, October 27-29, 2008, P. 183-197.
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>